

В.В. Войцехович, В.Б. Губин, А.В. Микулич

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ АДАПТИВНЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Приводятся результаты экспериментальных исследований фазовых искажений, возникающих при распространении света в турбулентной атмосфере. Проведено сравнение экспериментально полученных статистических характеристик фазовых искажений, сделана оценка основных параметров адаптивных систем.

Для корректного выбора основных параметров адаптивных оптических систем (быстродействие, число корректируемых aberrаций, амплитудный динамический диапазон корректора) необходимо экспериментально определить спектры пространственных и временных частот корректируемых фазовых искажений. Удобным методом исследования, позволяющим зарегистрировать динамику пространственной структуры фазовых искажений, является скоростной или динамический метод Гартмана [1]. Эксперименты по исследованию динамики фазовых искажений проводились в ночное время в мае и августе 1986 г. на Симеизской научной базе Астросовета АН СССР (СНБА) на телескопе Цейсс-600 (диаметр апертуры 0,6 м, штатный фокус 7,5 м). Регистрировалась динамика искажений плоских волн видимого диапазона, распространяющихся через атмосферу от звезды. Скорость съемки киногартманограмм — 48 кадр/с. Использование в экспериментах оптической системы, удлиняющей фокус телескопа, позволило получить смещения центров тяжести пятен на киногартманограммах 150–200 мкм что сделало возможным проведение первичной координатной обработки данных на комплексе СВИТ [1]. Последующая математическая обработка заключалась в вычислении статистических характеристик коэффициентов разложения фазового поля на апертуре по полиномам Цернике (классические aberrации), упорядоченным аналогично [2]. При этом дисперсии коэффициентов разложения дают информацию о вкладе каждой из aberrаций в общее искажение, а их временные корреляционные функции — о скоростях изменения соответствующих aberrаций.

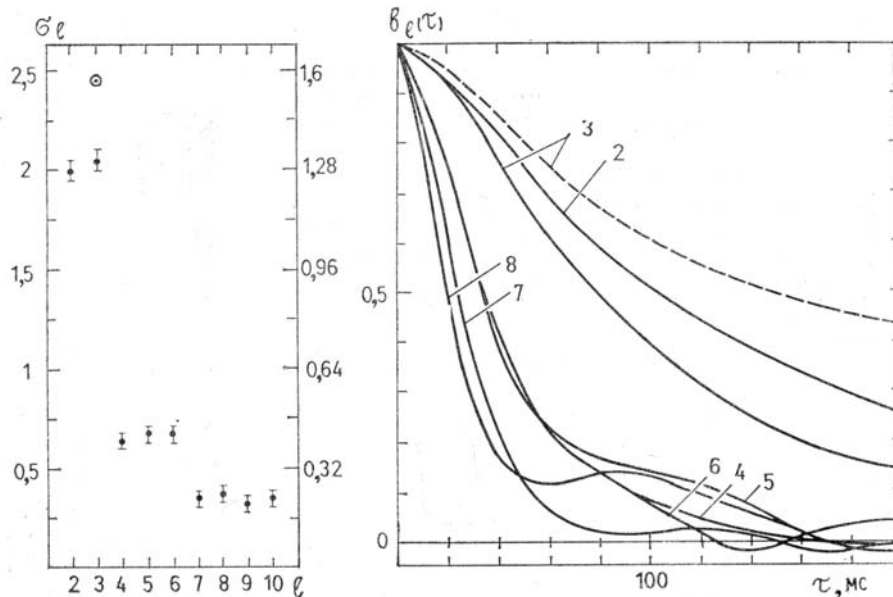


Рис. 1. Стандарты (слева) и АКФ (справа) коэффициентов разложения: 2, 3 — наклоны; 4 — дефокусировка; 5, 6 — астигматизм; 7, 8 — кома

На рис. 1 приведены стандарты (среднеквадратичные отклонения) коэффициентов разложения σ_l в зависимости от номера aberrации l (слева) и нормированные временные корреляционные функции (АКФ) $b_l(\tau)$ (справа), полученные усреднением по 12 экспериментам (2, 3 — наклоны, 4 — дефокусировка, 5, 6 — астигматизм, 7, 8 — кома). Шкала слева — нормировка аналогична [2], шкала справа — нормировка выбрана таким образом, что значения коэффициентов представляют собой отклонения соответствующих aberrаций на краю апертуры от плоскости, выраженные в единицах длин волн (для длины волны 0,55 мкм). Анализ показал, что в статистические характеристики наклона по оси Y

(№ 3) существенный вклад дают ошибки часового ведения телескопа (эксперименты проводились таким образом, чтобы направление часового ведения совпадало с направлением оси Y), представляющие собой гармоническую функцию с периодом $\sim 2,7$ с. Ошибки часового ведения отфильтровывались в процессе обработки данных. На рис. 1 (слева) точками показаны стандарты коэффициентов после фильтрации, кружок с точкой — стандарт коэффициента № 3 до фильтрации, сплошные линии справа — АКФ после фильтрации, пунктирная кривая — АКФ наклона по Y до фильтрации. Из анализа рис. 1 можно сделать следующие выводы.

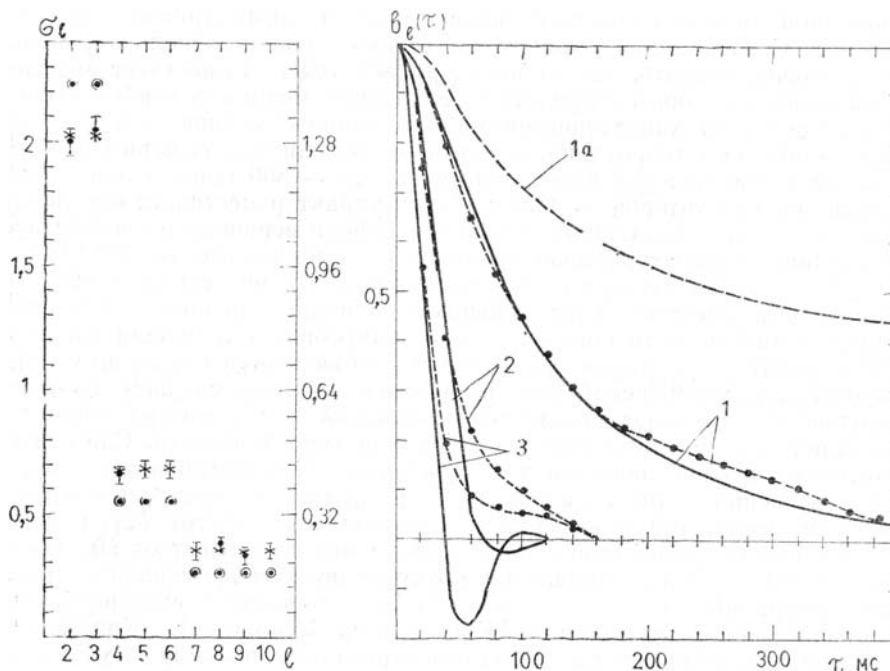


Рис. 2. Стандарты (слева) и АКФ (справа) коэффициентов разложения: кружки с точкой — стандарты для колмогоровской модели ($r_0 = 14,2$ см, $L_0 = \infty$); крестики — стандарты для экспоненциальной модели ($r_0 = 9,8$ см, $L_0 = 7$ м); точки — экспериментальные данные. Сплошные линии — АКФ для экспоненциальной модели ($L_0 = 7$ м, $v = 5$ м/с); штрих-пунктирные линии — экспериментальные АКФ; пунктирная линия — АКФ наклона для колмогоровской модели ($L_0 = \infty$, $v = 5$ м/с)

1. Относительный вклад aberrаций в общее искажение волнового фронта падает с ростом порядка aberrации, причем основной вклад вносят наклоны волнового фронта.
2. Вклады aberrаций одного порядка близки друг к другу.
3. Радиус временной корреляции падает с ростом порядка aberrации, причем радиусы временной корреляции aberrаций одного порядка близки друг к другу.
4. В условиях астрономических наблюдений ошибки часового ведения телескопа могут дать существенный вклад в статистические характеристики фазовых искажений.

На рис. 2 представлены результаты сравнения полученных экспериментальных данных с теоретическими расчетами для двух моделей спектра флуктуации показателя преломления $\Phi_n(\kappa)$: колмогоровский спектр $\Phi_n = \kappa^{-11/3}$ [2, 3] и экспоненциальный спектр, учитывающий влияние внешнего масштаба турбулентности $\Phi_n = \kappa^{-11/3}[1 - \exp\{4\pi^2\kappa^2 / L_0^2\}]$ [3, 4], где L_0 — внешний масштаб турбулентности. Кривые 1, 2, 3 — средние АКФ первого, второго и третьего порядков aberrаций соответственно. Из рис. 2 видно, что теоретические расчеты, сделанные с учетом влияния внешнего масштаба турбулентности, значительно лучше аппроксимируют экспериментальные данные. Оптимальное соответствие между экспериментальными и теоретическими результатами было получено при следующих параметрах: радиус Фрида $r_0 = 9,8$ см, внешний масштаб турбулентности $L_0 = 7$ м, скорость переноса неоднородностей $v = 5$ м/с.

Результаты теоретических расчетов [3, 4], строго говоря, применимы только для однородной трассы, сопоставление же этих результатов с нашими экспериментальными данными, полученными на неоднородной трассе, позволяет оценить только эффективные значения L_0 и v . С физической точки зрения такое сопоставление оправдано, если можно считать, что на неоднородной трассе существует выделенный слой, в котором сосредоточена большая мощность турбулентности с однородными характеристиками. По нашему мнению, такой спецификой обладает территория, на которой проводились эксперименты, так как место наблюдений находится на высоте ~ 300 м на склоне горной гряды, высота которой ~ 900 м. Такой характер местности обуславливает специфику воздушных потоков в районе вершины и способствует созданию сильно турбулизированного слоя на высоте ~ 700 — 900 м.

Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами расчетов, учитывающими влияние внешнего масштаба турбулентности, в то время как для колмогоровской модели наблюдается значительное рассогласование. Это объясняется следующими причинами. Колмогоровский спектр, являясь частным случаем экспоненциального, описывает статистику искажений для диаметра апертуры, лежащего внутри инерционного интервала турбулентности. Следствием этого ограничения является тот факт, что для колмогоровской модели при изменении диаметра апертуры D не происходит перераспределения энергии искажений в спектре пространственных частот [2] (относительный вклад aberrаций в общее искажение не зависит от D). Также не зависит от D и соотношения между радиусами временной корреляции aberrаций [3] (отметим, что для колмогоровского спектра первый корреляционный момент для АКФ наклона бесконечен). Кроме того, экспоненциальный спектр, не являясь строго обоснованной теоретически моделью, позволяет рассмотреть, благодаря учету влияния внешнего масштаба турбулентности, изменение вида спектров временных и пространственных частот фазовых искажений в зависимости от диаметра апертуры и радиуса Фрида. По-видимому, в наших экспериментах специфика местности обуславливает относительно малую величину внешнего масштаба турбулентности, что приводит к рассогласованию с колмогоровской моделью. Не исключено также влияние подкупольного пространства башни телескопа.

Статистические характеристики фазовых искажений, полученные в результате экспериментов, были использованы для оценки основных параметров адаптивных систем. Для этой цели были введены следующие критерии фазовой коррекции: динамическая ошибка коррекции δ^2 и эффективность фазовой коррекции суммы N первых aberrаций γ_N в зависимости от времени накопления системы Δt .

Динамическая ошибка коррекции была введена в предположении, что время срабатывания корректора много меньше Δt . Пусть система в начале n -го цикла коррекции мгновенно обрабатывает средний сигнал, зарегистрированный в $n-1$ -м цикле, причем в течение n -го цикла после мгновенной обработки корректор неподвижен. Дисперсию рассогласования между временными зависимостями обрабатываемого сигнала и положения корректора, нормированную на дисперсию корректируемого сигнала, назовем динамической ошибкой коррекции. Динамическая ошибка коррекции представляет собой относительную остаточную дисперсию корректируемого процесса и для стационарного процесса выражается через его нормированные корреляционные функции $b(\tau)$:

$$\delta^2(\Delta t) = 1 + \frac{1}{\Delta t^2} \int_0^{\Delta t} dt \int_{t-\Delta t}^{\Delta t} d\tau b(\tau) - \frac{2}{\Delta t^2} \int_{\Delta t}^{2\Delta t} dt \int_{t-\Delta t}^t d\tau b(\tau). \quad (1)$$

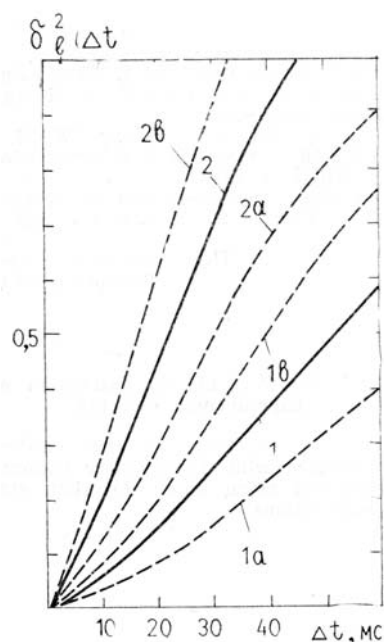


Рис. 3. Зависимость динамической ошибки коррекции от времени накопления: 1 — наклон; 2 — дефокусировка

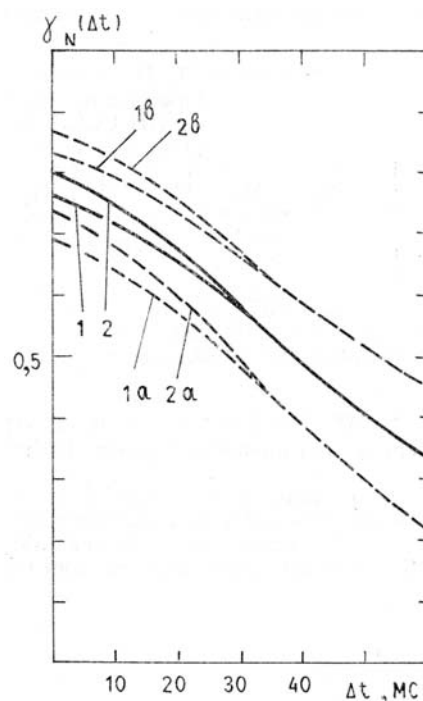


Рис. 4. Зависимость эффективности фазовой коррекции от времени накопления: 1 — компенсация наклонов; 2 — компенсация наклонов+дефокусировки

Динамическая ошибка коррекции учитывает ограничения динамического диапазона системы в области временных частот. Используя $\delta^2(\Delta t)$, введем критерий эффективности фазовой коррекции $\gamma_N(\Delta t)$, учитывающий ограниченность динамического диапазона системы как в области временных, так и в области пространственных частот:

$$\gamma_N(\Delta t) = \sum_{l=2}^N [1 - \delta_l^2(\Delta t)] \sigma_l^2 / \sum_{l=2}^{\infty} \sigma_l^2, \quad (2)$$

где δ_l^2 и σ_l^2 — динамическая ошибка коррекции и дисперсия l -й аберрации соответственно. $\gamma_N(\Delta t)$ показывает, какую часть общей дисперсии фазовых искажений (без учета постоянной составляющей) компенсирует адаптивная система с временем накопления Δt , корректирующая только N первых аберраций.

На рис. 3, 4 приведены результаты расчетов зависимости $\delta_l^2(\Delta t)$ и $\gamma_N(\Delta t)$ для двух практически важных случаев: компенсации наклонов+дефокусировки. Сплошные кривые 1 и 2 — средние условия, пунктирные кривые 1а, 1в, 2а, 2в — соответствующие среднеквадратичные разбросы по экспериментам.

Анализ рис. 3, 4 позволяет сделать следующие выводы. Для условий, в которых проводились эксперименты, адаптивная система первого порядка (корректирующая только наклоны волнового фронта) дает возможность скомпенсировать значительную часть фазовых искажений (50–65%), однако для достижения этого система должна обладать довольно высоким быстродействием (время накопления 20–40 мс). Адаптивная система, корректирующая наклоны+дефокусировку, дает по сравнению с системой, корректирующей только наклоны, незначительное улучшение качества коррекции (< 4%), причем для этого требуется большее, чем при коррекции наклонов, быстродействие (время накопления ≤ 20 мс).

1. Балаховская Т.И., Борисенко В.И., Витриченко Э.А., Масленников К.Л., Прохоров А.М., Сагдеев Р.З., Трушин Е.В., Чесалин Л.С. — Докл. АН СССР. 1984, т. 274, № 5, с. 257–260.
2. Wang J. Y., Markey J. K. — J. Opt. Soc. Am., 1978, v. 68, № 1, p. 78–87.
3. Войцехович В.В. Временные характеристики адаптивной астрономической системы. — М., 1984. — 24 с. (Препринт № 873/ИКИ АН СССР).
4. Войцехович В.В. Влияние внешнего масштаба турбулентности на искажения волнового фронта. — Изв. АН СССР. ФАО, 1986, т. 22, № 4, с. 427–429.

Институт космических
исследований АН СССР,
Университет дружбы народов
им. Патриса Лумумбы, Москва

Поступила в редакцию
9 марта 1988 г.

V. V. Voitsekhovich, V. B. Gubin, A. V. Mikulich. Estimation of Adaptive Astronomical System Parameters Based on Experimental Evidence.

The results of experimental investigation of atmospheric turbulence phase distortions are presented. The experimental data are compared with theory. Basic parameters of the phase compensation systems are evaluated using phase distortion statistical characteristics obtained from experimental observations.